

David K. Ferry

詳説 半導体物性

理学博士 落合 勇一
理学博士 関根 智幸 共訳
博士(材料科学) 青木 伸之

コロナ社

Semiconductors

Bonds and bands

by

David K. Ferry

Copyright © 2013 IOP Publishing Ltd

This book was first published in English by IOP Publishing Limited.

Copyright in the book is owned by IOP Publishing Limited.

Japanese translation rights arranged with IOP Publishing Limited, Bristol, UK
through Tuttle-Mori Agency, Inc., Tokyo.

訳者まえがき

この度機会があり、フォノン物性、低次元系物性および光物性が専門の関根先生、ナノスケール伝導探査が専門の青木先生、および半導体電気伝導を研究しています落合、この3名が、フェリー先生の著書翻訳者となり、本書を出版することになりました。長い間大学院生向け関連講義を担当されてまとめあげられた本書は、まさにナノスケール伝導の基礎を学べる教科書として最適であります。

落合らは、以前からフェリー研との国際共同研究を実施し、フェリー先生の千葉大学での英語講義担当にても、大変お世話になっております。最前線の研究者・技術者にも大いに参考となる本書ですが、関連分野を勉強の学部・大学院の諸君も含めて、ナノ電子伝導物性最前線を勉強できる教科書であります。

2016年2月

訳者を代表して 落合 勇一

著者まえがき

本書は、1991年に出版された『Semiconductors』という題名の教科書改訂版です。なお、旧版も含めて、半導体電子物性の大学院学生向けの教科書として、同大学等にて多年にわたり講義等に利用されています。半導体の電子物性は、金属や絶縁体のそれらとは基本的に異なっている部分が多く、また、半導体そのものは多くのマイクロ・エレクトロニクスやマイクロ・オプティックス関連で多用されて、現在、大変重要な電子部品のひとつになっております。こ

の教科書では、とりわけ、半導体デバイスの電子伝導を理解する上で重要かつ基本となる電子バンド構造、格子力学、そして電子-フォノン相互作用等の基本概念も加えて、最近の最先端半導体材料の紹介も含めた解説も行っています。そして本書は、現在も大学院初年度コースの講義で教材にされている内容です。

David K. Ferry

著 者 紹 介

David K. Ferry



本書の著者、フェリー先生は現在、アリゾナ州立大学の終身名誉教授であります。先生は、大学等での講義や講演、そしていくつかの学会活動参加等のため、現在でも米国本土を始めとして、世界中を駆け巡っております。また、先生はナノエレクトロニクス関連の優れた研究業績によって、IEEE学会より名誉ある Cleo Brunetti 賞を 1999 年に授与されるとともに、これまでも多くの受賞歴があります。フェリー先生の数多くの著書・論文など著名な業績に関しては、先生のホームページ <http://ferry.faculty.asu.edu> にて見ることができます。

目 次

訳者まえがき

著者まきがき

著者紹介

1. 序 言 1

1.1 デバイスマデル 3

1.2 この本の特徴 7

演習問題 10

引用・参考文献 10

2. 電子構造 12

2.1 周期ポテンシャル 13

2.1.1 ブロッド関数 14

2.1.2 周期性とエネルギーギャップ 16

2.2 ポテンシャルと擬ポテンシャル 21

2.3 実空間手法 24

2.3.1 一次元バンド 25

2.3.2 二次元格子 30

2.3.3 三次元格子-四面体配位 34

2.3.4 第一原理と経験的取扱い 42

2.4 運動量空間手法	44
2.4.1 局所擬ポテンシャル手法	46
2.4.2 非局所項	50
2.4.3 スピン-軌道相互作用	54
2.5 $k \cdot p$ 法	57
2.5.1 価電子帯-伝導帯近似	59
2.5.2 波動関数	65
2.6 有効質量近似	66
2.7 半導体合金	71
2.7.1 仮想結晶近似	71
2.7.2 合金秩序化	74
演習問題	77
引用・参考文献	80

3. 格子力学 83

3.1 格子波とフォノン	84
3.1.1 一次元格子	84
3.1.2 2原子格子	86
3.1.3 一次元格子の量子化	90
3.2 変形可能な固体中の波	94
3.2.1 (1 0 0) 方向の波	98
3.2.2 (1 1 0) 方向の波	98
3.3 誘電関数と結晶格子	100
3.4 フォノン動力学の計算モデル	103
3.4.1 シェル(殻)モデル	103
3.4.2 価電子力場モデル	105
3.4.3 ボンド-電荷モデル	107
3.4.4 第一原理アプローチ	111
3.5 非調和力とフォノン寿命	115

3.5.1 非調和項ポテンシャル	115
3.5.2 フォノン寿命	118
演習問題	119
引用・参考文献	120
4. 電子-フォノン相互作用	122
4.1 基本相互作用	123
4.2 音響型変形ポテンシャル散乱	126
4.2.1 球対称バンド	126
4.2.2 楕円体バンド	129
4.3 ピエゾ（圧電）相互作用散乱	130
4.4 光学フォノン散乱とバレー間散乱	133
4.4.1 ゼロ次散乱	134
4.4.2 選 択 則	136
4.4.3 一 次 散 乱	138
4.4.4 変形ポテンシャル	139
4.5 極性光学フォノン散乱	144
4.6 その他の散乱過程	147
4.6.1 イオン化不純物散乱	147
4.6.2 二次元でのクーロン散乱	151
4.6.3 表面粗さ散乱	156
4.6.4 合 金 散 乱	159
4.6.5 格子欠陥散乱	161
演習問題	165
引用・参考文献	166

5. キャリヤ伝導	171
5.1 ボルツマン輸送方程式	172
5.1.1 緩和時間近似	178
5.1.2 伝 導 度	180
5.1.3 拡 散	184
5.1.4 磁気伝導度	186
5.1.5 高磁場での輸送現象	190
5.1.6 緩和時間のエネルギー依存性	199
5.2 輸送現象におけるスピンの効果	201
5.2.1 バルク反転非対称性	203
5.2.2 構造反転非対称性	206
5.2.3 スピンホール効果	208
5.3 アンサンブルモンテカルロ法	208
5.3.1 自由飛行モデル	212
5.3.2 散乱後の終状態	214
5.3.3 時 間 同 期	217
5.3.4 非線形過程での棄却法	218
演 習 問 題	224
引用・参考文献	225
索 引	227

翻訳分担

- 1, 2章 落合 勇一
- 3, 4章 関根 智幸
- 5 章 青木 伸之

1

序

言

21世紀を迎えてすでに10年以上が経過し、この間のマイクロ・エレクトロニクスの急速な進歩は驚くべきものがあり、まさにこの恩恵によって、ライフスタイル革命が始まっている。この進歩の原点は、前世紀に開始されたIT革命であり、今世紀に入ってから、日々の生活に浸透し続けており、明らかに急速な展開をみせている。この発展成長には終わりが見えず、今後も日々の生活に影響し続けることであろう。

このようなマイクロ・エレクトロニクスの急速な成長は、単一集積回路中のトランジスタ素子数の高密度化に支えられており、その高密度化速度はムーアの法則として知られている。最初のトランジスタが前世紀半ばに登場してから現在までをムーアの法則で考えると、ほぼ 1 cm^2 のシングルチップ中に、トランジスタが数十億個あることになる。画期的なこの技術の立役者は高純度のSi（シリコン）結晶であり、微細加工技術によって、ほぼ自由自在に物性制御が可能となり、かつ単純で安定した半導体材料、絶縁性酸化物 SiO_2 との組合せに負うところが大きい。従来から、Siは、赤外線撮像素子やマイクロ波通信素子等、多くの光技術でも重要とされ、特殊な用途のための高性能新素材としても扱われている。ある特定の物質の上に、原子スケールでほかの物質を積み上げる革新的な技術の出現は、半導体のバンドギャップ等の基本定数を制御し、さらに混晶比も同時に制御可能となって、思いどおりの化合物半導体を成長させる技術として登場し、これにより本質的に特性が異なる新たな物性を持つ人工格子やヘテロ構造の製造手段として、現在も発展し続けている。

なぜこのような技術が可能となったのかは、半導体の特徴である幅広い諸特

性に秘められており、それと同時にある程度一般的に協調しあう性質も有しており、柔軟かつおたがいに共通した動作特性を受け入れる下地があるからである。これは、有用となるほとんどの半導体材料が、単純立方、閃亜鉛鉱型、またはより一般的なダイヤモンド構造になっていることにもよるのかもしれない。三次元物質とは、もちろん構造的には異なるが、最近登場の炭素グラフェンなども、半導体での研究が進んでいるので、さらにユニークな近未来の半導体素子として重要になるであろう。このように、半導体に見られる広い範囲の諸特性は、個々の原子の位置の微かなずれや微妙な特性変化から生じることが事実であるが、大局的に捉えてみるならば、結晶構造等の類似性の程度によっても、諸特性が変化することになっている。

半導体は 1833 年に Faraday^{1)†} によってすでに発見されていたが、その後、金属-半導体接合素子が初めて登場し、実際に使用可能になった時点で市民権が得られた²⁾。この接合素子の動作原理は、数十年経ても十分な説明がなされなかったが、ベル研究所³⁾での最初の(接合)トランジスタの発見が契機となって、実働トランジスタや電界効果デバイスに関する動作提案である、多数の研究が出現した。そして、ほんの数年前までの半導体電子輸送や半導体デバイスの機能動作の研究では、それらは移動度の概念と拡散係数のみを用いた簡単な擬一次元デバイスモデルと単純な輸送現象によって、ある程度合理的、かつ多少詳しく説明することができた。しかしながら、実はこの時点ですでに問題が現れていて、このような単純なモデルでは破綻が生じていたのであり、置換すべきデバイスモデルの探査のために、多大な努力を費やすことになった。私たちは現在、伝導解析用フル(全)バンド・アンサンブルモンテカルロ法を利用することができるので、開発と研究、両者に適するシミュレーションツールを駆使することができる。このフルバンドという意味は、最新のナノスケールデバイスに現れる高電場下でも、ブリュアンゾーンの広範な領域についての伝導が起こるとき、電子と正孔(ホール)を含めたバンド構造全体にわた

† 肩付き数字は、章末の引用・参考文献の番号を表す。

るブリュアンゾーンでのシミュレーションが可能であるということである。このアンサンブルモンテカルロ法は、ボルツマン輸送方程式の粒子表示を用いる伝導厳密解にも対応できる。これらのシミュレーションパッケージの利用は、ブリュアンゾーン内の電子バンド構造の完全理解につながっていて、結晶格子の動力学的振動であるフォノンの振舞いや、電子とフォノンの相互作用が運動量やエネルギーによって変化する様子なども見ることができる。そして、上記シミュレーションパッケージを作成するには、必要とされるいくつかの関連の伝導現象を理解しなければならないが、これも本書の目標の一つになっている[†]。以上により、本書の読者は、ある程度すでに結晶構造やブリュアンゾーンの基礎的な知識があり、かつ量子力学にもある程度精通していることを想定している。

1.1 デバイスモデル

これまでの半導体デバイス解析では、ドリフト移動度と拡散係数を用いて、単純かつ緩いバンド傾斜のチャネル近似を用いる解析法で伝導をモデル化し、輸送現象を考察してきた。このようなデバイス基礎理論は、学部カリキュラムの一つとして講義されている。実際に、適切な短チャネル補正や速度の飽和を考慮することにより、比較的良好な解析をすることができる。しかしながら、今日では一般的な能動デバイスである MOSFET のような小さいサイズの場合であっても、簡便なポアソン方程式の解を用いることによって、より体系的にモデル化することができるようになっている。実際に、比較的単純な輸送モデルと結合させたポアソン方程式によるモデリングを行うと、遅延時間（スイッチング速度）やエネルギー散逸と遅延時間との積などの予測計算値は、実験結果との良好な一致が得られている。しかし、デバイス物理学の細部にわたる詳

[†] 訳者注：もちろん、本書は計算機シミュレーションそのものを目標とするのではなく、むしろ新しいナノ炭素系等含め、それらの電気伝導の教科書として十分活用可能となっている。

細な追求を行うためには、^{ひず}歪みが有効質量や移動度、およびゲート酸化膜を通してのトンネル効果に及ぼす結果などを考慮する、より複雑かつ微視的なアプローチが必要とされる。

一般的に、数値シミュレーションはデバイス物理の研究者が日々使用するツールとみなされ、とりわけいくつかの典型的な場合には、以下三つの例にあるように、ほぼルーチンワークとして使用されている。すなわち、(1) 素子特性が非線形になってしまう場合、あるいは見つけ出した微分方程式が適正に閉じる解の形式になっていない場合、(2) つぎには、今日のCMOS技術開発に考えたような^{ひず}歪みSiの導入など、新たなプロセスでの物理探査実験などでは、あまりにもコストが^{かさ}嵩むので、初期段階のつかみどころのない開発段階での探査実験の代わりとして使用する場合であって、(3) 最後の場合としては、回路やチップレベルでのコンピュータ応用の設計である。興味深いことに、(2)は、以前の実験と理論⁴⁾への貢献に加えて科学研究の第三のパラダイムと呼ばれる計算機科学の新領域でもあり、複雑な輸送現象の研究に貢献できる。もとより、この新しい(当時)[†]アプローチは理論的な実験、あるいは実験的な理論とみなされるものであった。ここでは、それが一つの拡張子やほかのオリジナル概念を越えているものであるとして理解が得られるならば、現時点での半導体デバイスの設計に重要な貢献をもたらす。

半導体デバイスのシミュレーションとモデリングには、いくつかの要点が伴うことに注意する必要がある。まず初めに、電位や電荷の分布を自己無撞着^{どうちやく}に決めると同時に、粒子の運動を引き起こす内部電場を決めることであり、いわゆるセルフコンシステント・ポアソン方程式である。つまり、この粒子の運動とともに、デバイス内の格子振動、表面、および不純物からの散乱も考慮する必要がある。従来、後者は拡散係数と移動度により推定されていた。その後、散乱過程に対しては、緩和時間近似のボルツマン輸送方程式を用いていた。しかしながら、現在のアンサンブルモンテカルロ法の出現により、個々の

† 訳者注：1991年の出版当時と考えられる。

粒子の流れの追跡や、キャリア密度と速度を決めるための局所平均を用いることが可能となっている。しかしながら、デバイス自身も進化し、かつより複雑になっているので、さらなる改良が必要であり、ここで議論しているフルバンド・アプローチによる、半導体の詳細なバンド構造の構築が必要となっている。

例えば、Si デバイスではエネルギーがおよそ 0.4 eV 以上の光子が放射されることが、よく知られている。しかし、実際のバンドギャップは 1.0 eV 以上となっているので、エネルギーが 0.4 eV 程度の光子は、伝導帯から価電子帯への遷移には関与できないことになっていて、このような低エネルギー域の放射の説明には少々問題がある。これに関しては、いくつかの難解な説明がなされていたが、答えは一見単純のようでもあり、実際にはより複雑な状況である。図 1.1 には、低いほうの伝導帯（図の中央部分）と価電子帯の上部が示されている。バンドギャップは、 Γ 点にある価電子帯の頂上から、斜め右上にある X 点近くの伝導帯の底までの間になる。このギャップは、 1.0 eV を多少上回る値になっている。バンドギャップ内では伝播^{でんぱ}できる波動の状態がないので、価電子帯から伝導帯への光学遷移は、バンドギャップの値よりも大きなエネルギーに関与した遷移となる。つまり、フォトンエネルギーがバンドギャップよりも大きい場合の光学遷移が起こるはずである。ここでは、 X 点での最

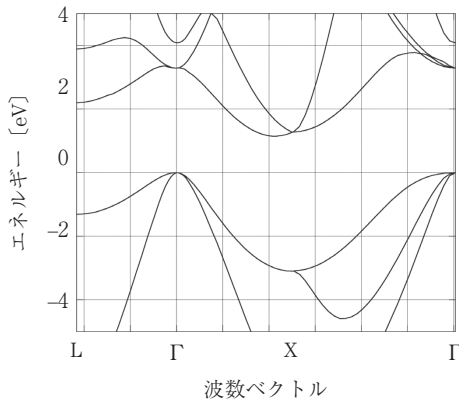


図 1.1 経験的擬ポテンシャル法により計算された Si のバンド構造。電子波が存在できない 0 から 1 eV までの領域にバンドギャップがある。

索 引

【あ】	殻模型	103	光学型結合定数	138
アインシュタインの関係式	化合物半導体	1	光学遷移	5
185, 200	重なり積分	127	光学モード	90
圧縮応力	仮想結晶ポテンシャル	73	合金散乱	72, 159, 160
圧電効果	仮想結晶模型	159	格子欠陥散乱	161
圧電散乱	価電子帯	5	格子振動	4, 6, 90
圧電相互作用	価電子力場模型	105	格子力学	7, 9, 83
粗い粒子化	緩和時間近似	4, 9, 178	構造反転非対称性	203, 206
アンサンブルモンテカルロ			混晶比	1
法	【き】		【さ】	
2, 4, 6, 208	棄却	220	最近接相互作用	25, 32
【い】	棄却法	218	最低伝導帯	6
イオン化不純物散乱	擬ポテンシャル	23, 111, 114	散乱断面積	148
移動演算子	逆格子ベクトル	31, 123, 124		
一次散乱	キャリコバイライト変形	76	【し】	
移動度	球対称バンド	126	シェル模型	103
2, 4, 9	球対称ポテンシャル	44	時間周期	218
【う】	強調平面波法	44	磁気長	191
ウムクラップ過程	共有結合半導体	105	磁気伝導度	186
ウルトツ鉱結晶	極性光学フォノン散乱	144	自己散乱	214
運動量演算子	極性モード	102, 144	自己散乱過程	216, 221
68			自己相関関数	157
【え】	【く】		四面体結晶構造	34
エバルト和	空乏層	154	四面体配位半導体	96
エルミート	グラフェン	30	終状態	214
エルミート共役	グラフェン電子系	5	自由飛行	209
36	クーロン散乱	151	自由飛行モデル	212
【お】	クーロン相互作用	8	シュベニコフド・ハース	
音響型変形ポテンシャル			効果	193
126, 138	【け】		準運動量	67, 68
音響モード	結晶運動量	59, 66	準粒子	12, 66
89, 94	結晶ポテンシャル	12, 13	人工格子	1
【か】	ゲート酸化膜	4		
拡散	【こ】		【す】	
184	高温近似	128, 129	スティフネス定数	98, 99
拡散係数				
2, 4, 185				

- | | | | | | |
|-------------|--------------|-----------------|---------------|--------------|---------------|
| スピン-軌道相互作用 | | 電界効果デバイス | 2 | 非縮退半導体 | 152 |
| | 12, 54, 202 | 電気伝導度 | 9 | 非弾性散乱過程 | 133 |
| スピンホール効果 | 208 | 電子-格子相互作用 | 9 | 非調和項ポテンシャル | 115 |
| 【せ】 | | 電子親和力 | 159 | 非調和力 | 115 |
| ゼーマン効果 | 201 | 電子正孔の溜り | 165 | 非放物線バンド | 123 |
| ゼロ次散乱 | 134 | 電子バンド構造 | 3 | 表面粗さ散乱 | 156 |
| 閃亜鉛鉱型格子 | 34, 100, 160 | 電子-フォノン相互作用 | 7, 122 | 【ふ】 | |
| 閃亜鉛鉱型構造 | 108 | 伝導帯 | 5 | フェルミの黄金則 | 116, 117, 124 |
| 選択則 | 136 | 伝導度 | 180 | フォノン寿命 | 115, 118 |
| せん断応力 | 97 | 【と】 | | 複素転置行列 | 36 |
| せん断歪み | 96 | 動的遮蔽 | 145 | フックの法則 | 94, 96 |
| せん断ポテンシャル | 130 | トーマス-フェルミ遮蔽 | 107 | ブリュアンゾーン | 2, 3, 83 |
| 【そ】 | | トーマス-フェルミ遮蔽の | | ブロッホ関数 | 16 |
| 双曲線バンド | 63 | 波数 | 148 | ブロッホ状態 | 69 |
| 【た】 | | トンネル効果 | 4 | ブロッホ振動 | 67 |
| 第一原理アプローチ | 111 | 【な】 | | ブロッホ波動関数 | 69 |
| 第一伝導帯 | 6 | ナノスケールデバイス | 2 | ブロッホ和 | 32 |
| 第二ルジャンドル多項式 | 52 | 【は】 | | 分数量子ホール効果 | 199 |
| ダイヤモンド構造 | 2, 108 | パウリのスピン行列 | 59, 204 | 【へ】 | |
| 楕円体バンド | 129 | パーテックス補正 | 203 | ヘヴィサイドの階段関数 | 135, 139, 146 |
| 縦波光学モード | 102 | ハートリー近似 | 22 | ベガード則 | 75 |
| ダングリリングボンド | 151 | ハートリー-フォック近似 | 22 | ヘテロ構造 | 1 |
| 弾性散乱 | 128 | ハートリーポテンシャル | 154 | 変形ポテンシャル | 126, 127, 139 |
| 弾性ステイフネス定数 | 96 | バルク反転非対称性 | 203, 208 | 【ほ】 | |
| 断熱近似 | 9, 83, 111 | バレー間散乱 | 133 | ポアソン方程式 | 3 |
| 【ち】 | | 半経験的タイトバインディング法 | 40 | 膨張ポテンシャル | 130 |
| チャーン数 | 197 | 反転層 | 151, 154, 157 | ポーア磁子 | 201 |
| 調和振動子 | 92, 93 | バンド間散乱 | 133 | ボーズ-アインシュタイン | |
| 直交化平面波法 | 45 | バンド構造 | 6 | 分布関数 | 127 |
| 【て】 | | バンドゾーン境界 | 18 | 膨張歪み | 129 |
| ディラック点 | 165 | 【ひ】 | | 放物線バンド | 160 |
| ディラックバンド | 155 | ピエゾ相互作用 | 130 | ホール効果 | 9 |
| デバイ遮蔽 | 146 | ピエゾ効果 | 131 | ボルツマン輸送方程式 | 3, 4, 172 |
| デバイ遮蔽の距離 | 131 | ピエゾ散乱 | 148 | ボンド電荷 | 107 |
| デバイ遮蔽の波数 | 148, 162 | 非局所擬ポテンシャル | 50 | ボンド-電荷模型 | 107 |
| 転位 | 162 | 非極性光学フォノン | 140 | | |
| 転位散乱 | 163 | | | | |
| 電荷捕獲中心 | 151 | | | | |

【ま】		有効質量近似	66	ランダム合金理論	72
マラーセン則	201	有効電荷	100	【り】	
【め】		誘電関数	100	リジッドイオン近似	143
メゾスコピック構造	151	輸送現象	2	リジッドイオン模型	142
面心立方格子	34, 71	【よ】		リデン-ザックス-	
【も】		横波光学モード	101	テラーの関係式	102
モンテカルロアルゴリズム	212	【ら】		量子ホール効果	196
【ゆ】		ランダムポテンシャル	72, 159, 165	【る】	
有効質量	4	ランダウ準位	192, 193	ルジャンドル多項式	51
		ランダムウォーク	209	【わ】	
		ランダム合金	73, 74	湾曲パラメータ	159

【A】		【G】		【R】	
APW	44	<i>g</i> -因子	202	Rashba エネルギー	207
【B】		<i>g</i> -フォノン	136	Rashba 項	207, 208
BBGKY 階級方程式	174	【H】		Rashba スピン-軌道結合	203
【C】		Hellmann-Feynman の定理	111	Rashba の式	203
Chern 数	197	【K】		【V】	
Conwell-Weisskopf の方法	148	<i>k</i> · <i>p</i> 法	57	vertex 補正	203
【D】		<i>k</i> · <i>p</i> 項	58	【数字】	
Dresselhaus スピン-軌道結合	203	【O】		2 原子格子	27
Dresselhaus バルク反転非対称性	208	OPW	45	II-VI 族半導体	144
【F】				III-V 族化合物	141
<i>f</i> -フォノン	140			III-V 族半導体	50, 104, 144

— 記者略歴 —

落合 勇一（おちあい ゆういち）

- 1969年 東京教育大学理学部物理学科卒業
- 1974年 筑波大学技官
- 1976年 理学博士（東京教育大学）
- 1977年 筑波大学助手
- 1980年 筑波大学講師
- 1989年 文部省国際研究派遣（米国）
- 1992年 千葉大学助教授
- 1997年 千葉大学教授
- 2012年 千葉大学名誉教授

関根 智幸（せきね ともゆき）

- 1971年 東京教育大学理学部応用物理学科卒業
- 1976年 東京教育大学大学院理学研究科博士課程修了（物理学専攻）
理学博士
- 1976年 東京教育大学助手
- 1977年 筑波大学助手
- 1979年 筑波大学講師
- 1987年
- ～1988年 パリ第6（Pierre et Marie Curie）大学客員研究員
- 1990年 上智大学助教授
- 1995年 上智大学教授
- 2013年 上智大学名誉教授

青木 伸之（あおき のぶゆき）

- 1994年 明治大学理工学部電子通信工学科卒業
- 1996年 北陸先端科学技術大学院大学材料科学研究科博士前期課程修了（物性科学専攻）
- 1998年 北陸先端科学技術大学院大学材料科学研究科博士後期課程修了（物性科学専攻）
博士（材料科学）
- 1999年 千葉大学助手
- 2004年 日本学術振興会海外特別研究員（米国アリゾナ州立大学フェリー・兼任）
- 2007年 千葉大学大学院助教
- 2008年 千葉大学大学院准教授
- 2012年 科学技術振興機構さきがけ研究員（併任）
現在に至る

詳説 半導体物性

Semiconductors—Bonds and bands—

© Yuichi Ochiai, Tomoyuki Sekine, Nobuyuki Aoki 2016

2016年5月2日 初版第1刷発行

検印省略

訳者 落合 勇 一
関根 智 幸
青木 伸 之
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 新日本印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844 ・ 電話 (03) 3941-3131 (代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-00879-1 (中原) (製本: 愛千製本所)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします